

# Étude originale

## Durabilité écologique de la filière

### L'aléa pluviométrique dans la prise de décisions en culture cotonnière pluviale

Michel Crétenet<sup>1</sup>  
Rabi H. Mohtar<sup>2</sup>  
Ali Angokai Moussa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), Unité de recherche « Systèmes cotonniers en petit paysannat », TA 72/09, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5 <michel.cretenet@cirad.fr>

<sup>2</sup> Agricultural and Biological Engineering Department, Purdue University, West Lafayette IN 47906 États-Unis <mohtar@purdue.edu>

<sup>3</sup> Institut de recherche agricole pour le développement (Irad), Centre de Maroua, BP 33, Maroua Cameroun <angokai@yahoo.fr>

#### Résumé

Les décisions d'ordre tactique que le paysan est amené à prendre au cours de la campagne agricole concernent des techniques culturales telles que l'application d'un complément d'engrais ou le déclenchement d'un traitement insecticide. Le système COTONS<sup>®</sup>\_SIMBAD associe un modèle mécaniste de simulation de la croissance et du développement du cotonnier et un modèle de simulation de dégâts de chenilles carpophages. Le système permet de simuler des « expérimentations virtuelles ». Sur un ensemble de 33 saisons des pluies enregistrées à Bobo Dioulasso (Burkina Faso), l'apport d'un supplément azoté comme la mise en œuvre d'une protection phytosanitaire, modifient sensiblement le risque de ne pas atteindre un objectif de rendement fixé *a priori*. La règle de décision d'un apport complémentaire d'azote tient compte de la hauteur des plants et du nombre de sites fructifères par plant ; la décision du déclenchement d'un programme de protection phytosanitaire est soumise à un seuil relatif au nombre de capsules vertes. Le « coût » de mise en œuvre de chacune de ces règles de décision est déduit de la fréquence de réalisation des conditions d'application de chaque règle.

**Mots clés :** coton ; Burkina Faso ; pluviométrie ; pratique culturale ; modèle de simulation ; engrais ; protection des cultures ; évaluation du risque ; seuil économique.

**Thèmes :** productions végétales ; climat ; eau.

#### Abstract

##### Risk assessment in decision-making on rainfed cotton

A probability-based methodology to assess the effect of year-to-year climatic variability, soil and management input on crop response is demonstrated using the COTONS<sup>®</sup>\_SIMBAD system. The methodology allows for the quantification of the risk associated with these input variability using a systematic and bias-free approach. It also allows the user to identify relevant crop state variables that can be used for short-term better decision making related to crop management. Because of the high cost and time involved in evaluating management practices, these modeling approaches can be effective tools for better decision making. Due to the significance in their results, the authors recommend this risk-based approach as a way to address decision making under site and climatic uncertainties. The COTONS<sup>®</sup>\_SIMBAD system is demonstrated as an important research tool for pushing back the limits of classical adaptive research programs. It provides an original tool to analyse the cotton crop response variability which could not have been assessed with classical enquiries or experimental designs. Under rainfed conditions, the climate remains the main determinant of variability in crop response under a reference crop management sequence. This uncertainty in crop response is simulated by the model and analysed in terms of risk according to yield targets and crop management sequences. The intermediate crop state variables simulated by the model are used for day-to-day decision rules. This pilot research is an important step before evaluating these decision rules under field conditions. These decisions help reduce the risk of underyield a target value and have an economic cost associated which was also presented with these risks.

**Key words:** cotton; Burkina; pluviometry; cultivation; simulation models; fertilizers; crop protection; risk assessment; economic threshold.

**Subjects:** vegetal productions; climate; water.

Tirés à part : M. Crétenet

## Le risque dans la prise de décision

Les décisions prises par les paysans africains producteurs de coton sont d'ordre stratégique lorsque se posent en début de campagne agricole les questions relatives à la définition de l'assolement, à l'affectation des différentes cultures sur les différentes parcelles de l'exploitation, à l'ordre de leur mise en place ou à la prévision des itinéraires techniques propres à chacune d'entre elles. À chacun de ces choix correspond une prise de risques sur la capacité du système de production à subvenir aux besoins alimentaires et monétaires de la famille vivant sur l'exploitation. Ces risques sont très difficiles à évaluer et fortement déterminés par les aléas pluviométriques durant la campagne agricole à venir. L'aide proposée au paysan dans ses prises de décision d'ordre stratégique se limite au conseil fondé sur de trop rares études fréquentielles de la pluviométrie.

Les décisions d'ordre tactique que le paysan est ensuite amené à prendre en cours de campagne concernent des techniques culturales telles que le travail du sol, la date et la densité de semis, l'application d'engrais (date, type et dose), le déclenchement d'un traitement insecticide, etc. Les effets sur le rendement des différentes techniques culturales retenues dans les décisions successives au cours de la saison de culture sont en partie déterminés par les événements pluviométriques qui interviendront après ces choix. L'aide proposée par la recherche à ces prises de décisions de type tactique, se réfère à de multiples expérimentations multilocales et pluriannuelles. L'évaluation du risque pris lors de ces choix techniques est essentiellement intégrée dans les critères de l'analyse statistique classique des résultats de ces expérimentations : risques de première et seconde espèce à considérer telle technique supérieure à telle autre dans telle zone. Cependant cette évaluation du risque ne peut être appliquée à un site spécifique à cause d'un nombre à l'évidence trop limité de résultats expérimentaux relatifs à chaque situation culturale particulière, rendant inapplicables les outils statistiques.

Nous proposons ici une approche méthodologique fondée sur l'utilisation de COTONS<sup>®</sup> [1], un modèle mécaniste de

simulation de la croissance et du développement du cotonnier, pour évaluer le risque lié à l'aléa pluviométrique dans la prise de décision d'ordre tactique en culture cotonnière.

## Un système générateur d'expérimentations « virtuelles »

Le modèle COTONS<sup>®</sup>, dérivé du modèle américain GOSSYM [2], simule à partir de données climatiques journalières (rayonnement, températures, pluviométrie et vitesse du vent) et de caractéristiques du sol (texture, teneurs en carbone et en azote), la croissance et le développement du cotonnier en fonction de l'itinéraire technique défini par la variété, la date et la densité de semis et la fertilisation azotée. Ce modèle « plante » est couplé à un modèle « insecte » SIMBAD [3, 4] qui simule les dégâts de populations de chenilles carpophages définies par l'espèce (cycle de développement, voracité et préférences alimentaires) et les effectifs des chenilles à un moment du cycle. Le système couplé COTONS-SIMBAD permet ainsi de simuler les répercussions sur le rendement d'une « attaque » de chenilles.

Quatre objets sont en comparaison dans les essais virtuels simulés ; ils se définissent à partir d'un itinéraire technique de référence (ITR) : variété MID correspondant à une variété américaine de durée de cycle intermédiaire, semis précoce, densité de semis 62 500 plants/ha (0,80 m

interlignes et 0,20 m interplants), fertilisation azotée de 44 N/ha au semis et 23 N/ha au 45<sup>e</sup> jour après la levée (JAL), aucun traitement de contrôle de 3 attaques d'*Helicoverpa armigera* (100 000 chenilles/ha au 1<sup>er</sup> stade larvaire) respectivement au 71<sup>e</sup>, 86<sup>e</sup> et 102<sup>e</sup> JAL. Le deuxième itinéraire technique correspond à un apport supplémentaire d'azote (ITR + N) de 25 N/ha au 64<sup>e</sup> JAL. Le troisième objet de cette expérimentation virtuelle correspond à un contrôle des attaques parasitaires (applications insecticides à partir du 71<sup>e</sup> JAL) correspondant à une protection phytosanitaire de la culture (ITR + PP). Le quatrième et dernier objet associe complément azoté et protection phytosanitaire (ITR + N + PP).

Ces quatre itinéraires techniques sont simulés pour chacune des 33 années climatiques enregistrées à Bobo Dioulasso de 1950 à 1985 (sauf années 1981, 1982 et 1983) et sur quatre types de sols correspondant à différentes teneurs en argiles et sables (*tableau 1*) combinés à trois niveaux de fertilité du sol correspondant respectivement pour le sol peu fertile et très fertile à 0,5 et 1,5 fois les teneurs en matière organique du sol (MOS) et en azote (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) retenues pour le sol à un niveau de « fertilité normale » (*tableau 2*). Ce sont ainsi 396 « essais virtuels » (33 années\*4 sols\*3 niveaux de fertilité) comparant les quatre itinéraires techniques décrits qui sont simulés dans cet exercice. Il s'agit d'évaluer la sensibilité de la « réponse » du cotonnier exprimée par les rendements, à la variabilité des conditions édaphiques, climatiques et parasitaires imposées dans le « dispositif expérimental virtuel ».

**Tableau 1. Texture et caractéristiques hydrodynamiques des quatre types de sols retenus dans l'analyse.**

Table 1. Characteristics of the four soil textural types used in the analysis.

	S_16	S_25	S_34	S_42
Argile %	10	20	30	40
Sable %	60	50	40	20
Ksat cm/h <sup>a</sup>	63,6	18,8	8,2	6,4
Densité apparente <sup>a</sup>	1,55	1,43	1,35	1,27
% H <sub>2</sub> O à pF1 <sup>a</sup>	41,6	46,2	49,1	52,2
% H <sub>2</sub> O à pF2 <sup>a</sup>	31,1	35,4	39,4	45,0
% H <sub>2</sub> O à pF2.5 <sup>a</sup>	25,8	30,0	34,5	41,5
% H <sub>2</sub> O à pF3 <sup>a</sup>	20,5	24,6	29,6	37,9
% H <sub>2</sub> O à pF4.2 <sup>a</sup>	8,9	12,6	16,8	22,2

<sup>a</sup> Estimations par le modèle de Saxton [5].

**Tableau 2. Teneurs initiales du sol utilisées dans les simulations avec COTONS®.**

Table 2. Soil initial conditions used in COTONS® simulations.

	Niveau de fertilité « normale »			
	N_NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> kg/ha	N_NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> kg/ha	SOM %	H <sub>2</sub> O %
0-15 cm	19,18	2,13	0,62	80
15-30 cm	14,58	1,57	0,48	50
30-45 cm	14,14	1,57	0,46	50
45-60 cm	11,44	1,23	0,42	40
60-75 cm	9,76	1,12	0,37	40
75-90 cm	8,30	0,90	0,31	40
90-105 cm	6,84	0,79	0,25	30

## Le risque de ne pas atteindre l'objectif de rendement prévu

Dans l'application qui est faite ici de l'approche NAPRA (*NAtional Pesticide Risk Assessment*) de l'*United States Department of Agriculture* (USDA) [6, 7], le risque correspond à la probabilité de ne pas atteindre un objectif de rendement fixé *a priori*. Ainsi, pour chacun des quatre itinéraires techniques retenus, la probabilité *p* de dépasser un rendement fixé correspond au rang de ce rendement divisé par le nombre de simulations ( $n = 396$ ), et le risque évoqué vaut  $(1 - p)$ . La *figure 1* représente la probabilité *p* pour chacun des quatre itinéraires techniques définis dans le dispositif expérimental virtuel. Ainsi, pour un objectif de rendement de 1 500 kg/ha par exemple, la probabilité de dépasser ce niveau de rendement est pour ITR, ITR + PP, ITR + N et ITR + N + PP respectivement de 0,60, 0,63, 0,72 et 0,90 ; ce qui, exprimé en terme de risque de ne pas atteindre l'objectif de rendement fixé, correspond à respectivement 40 %, 37 %, 28 % et 10 %. Ainsi, pour l'objectif de rendement retenu de 1 500 kg/ha, l'apport d'un complément azoté permet de réduire le risque de ne pas atteindre l'objectif de 12 %, la protection phytosanitaire seule ne réduit le risque que de 3 %, alors que les deux interventions culturales réalisées simultanément portent la réduction du risque à 30 %.

Les effets attendus d'un apport complémentaire d'azote impliquent essentielle-

ment le processus de croissance et concernent donc principalement la composante « poids moyen capsulaire » du rendement. La protection phytosanitaire cible principalement les jeunes organes fructifères (boutons floraux et jeunes capsules) qui sont préférentiellement attaqués ; de ce fait les effets attendus d'une protection phytosanitaire concernent principalement la composante nombre de capsules par plant. La moindre efficacité de la protection phytosanitaire par rapport à celle du complément azoté enregistrée en année climatique « défavorable » (situations pour lesquelles le rendement est inférieur à 1 500 kg/ha), suggère que, dans ces conditions climatiques

défavorables, la plante n'a pas le temps de « compenser » la perte des jeunes fruits, alors que les effets de l'azote sur la taille des capsules peuvent, eux, s'exprimer avec des effets plus importants sur le rendement.

## Construction de règles de décision antialéatoires

On se propose ici d'identifier au moment où doit se prendre une décision d'ordre technique dans la conduite de la culture, quelles « conditions » permettraient de présager un effet positif « intéressant » de la technique culturale concernée. Les variables d'état de la culture sont considérées dans la démarche comme les critères potentiels pour la prise de décision. Les effets attendus d'un apport complémentaire d'azote ou d'un programme de traitements phytosanitaires sont une réduction du risque de ne pas atteindre un objectif de rendement fixé *a priori*.

La nature des critères sur lesquels repose la décision résulte de l'analyse des relations entre (i) les différentes variables d'état de la culture au moment où est prise la décision (64<sup>e</sup> JAL pour le complément azoté, 71<sup>e</sup> JAL pour le traitement

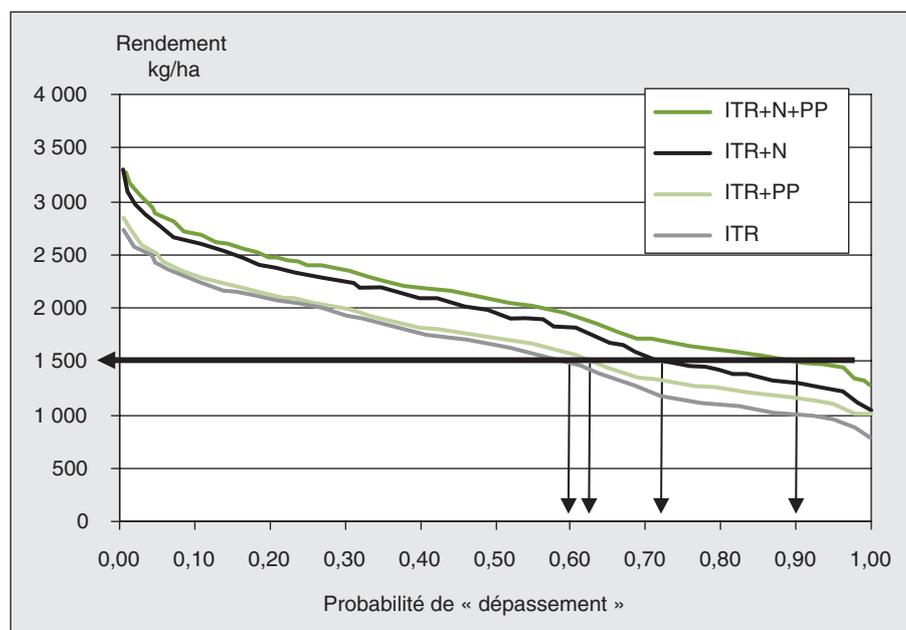


Figure 1. Évaluation du risque selon l'itinéraire technique.

Figure 1. Risk analysis for the four crop management sequences.

**Tableau 3. Coefficients de corrélation entre variables d'état de la culture à différentes dates (64<sup>e</sup> et 71<sup>e</sup> JAL) et rendement final.**

Table 3. Correlation coefficients between final yield and selected crop state variables used for the decision rules.

	64 <sup>e</sup> JAL	71 <sup>e</sup> JAL
Hauteur des plants	0,88	0,79
Nombre de nœuds de la tige principale	0,81	0,75
Surface foliaire par plant	0,87	0,76
NAWF ( <i>Node Above White Flower</i> )	0,80	0,69
Nombre de feuilles	0,86	0,78
Nombre de sites fructifères	0,88	0,80
Nombre de boutons floraux	0,87	0,71
Nombre de capsules vertes	0,81	0,81
Nombre de sites « abscissés »	0,88	0,62

JAL : jour après la levée.

insecticide) et (ii) les rendements obtenus avec l'itinéraire technique de référence (ITR). Ainsi comme l'indique le *tableau 3*, les deux variables les mieux corrélées au rendement au 64<sup>e</sup> JAL, la hauteur des plants et le nombre de sites fructifères par plant, seront retenus comme critères de la décision pour l'apport d'un complément azoté. Pour le déclenchement du programme de protection phytosanitaire, c'est le nombre de capsules vertes au 71<sup>e</sup> JAL qui sera retenu comme la variable la mieux corrélée au rendement.

Les *figures 2, 3 et 4* représentent sous forme de nuages de points les régressions linéaires entre les variables d'états « intermédiaires » retenues comme critères de décision et le rendement final. Ces relations statistiques illustrent à un moment donné du cycle de la culture, le processus d'élaboration du rendement avec ses deux composantes : le poids moyen d'une capsule comme résultante d'un phénomène de croissance et le nombre de capsules par plant comme résultante d'un processus de développement. L'apport complémentaire d'urée vise à

améliorer prioritairement le poids moyen capsulaire et la protection phytosanitaire à augmenter le nombre de capsules par plant.

Les seuils pour ces critères, sur lesquels sont décidées les interventions culturales sont dépendants de l'objectif de rendement fixé *a priori*. Ainsi, pour un objectif de rendement visé de 1 500 kg/ha, tel que représenté sur les *figures 2 et 3*, on retiendra comme valeurs en deçà desquelles un complément d'azote est apporté 50 cm pour la hauteur des plants et 22 pour le nombre de sites fructifères par plant. De la même façon (*figure 4*), le programme de traitements phytosanitaires sera déclenché au 71<sup>e</sup> JAL si le nombre de capsules vertes par plant est inférieur à 4 à cette date.

La *figure 5* illustre les conséquences de l'application de ces règles de décision (RDD) en termes de limitation des risques de ne pas atteindre l'objectif de rendement fixé (1 500 kg/ha). Ainsi, le risque de ne pas atteindre l'objectif passe de 40 % avec l'ITR à 34 % en appliquant la RDD relative au complément azoté et à 20 % lorsque l'on applique les 2 RDD. Les effets de l'application des RDD sur la réduction des risques varient en fonction des niveaux de rendement effectivement atteints que l'on peut qualifier d'« objectifs de rendement *a posteriori* ». Cette réduction du risque est maximale pour un rendement objectif *a posteriori* de 1 400 kg/ha, avec un risque qui passe de 37 % pour ITR à 24 % (réduction de 13 %) et 13 % (réduction de 24 %) respectivement avec l'application de la RDD relative à l'azote et l'application des 2 RDD.

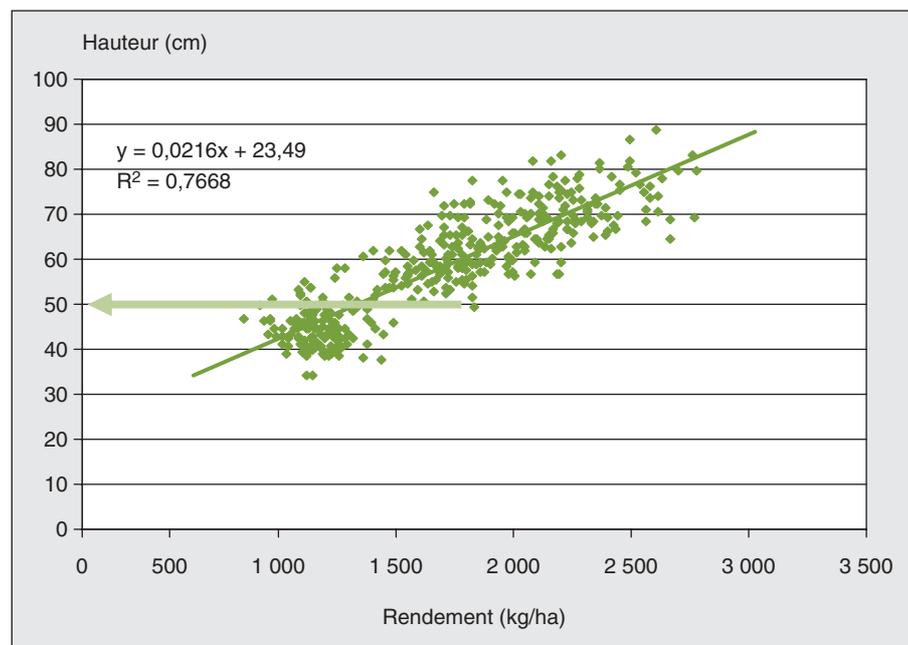
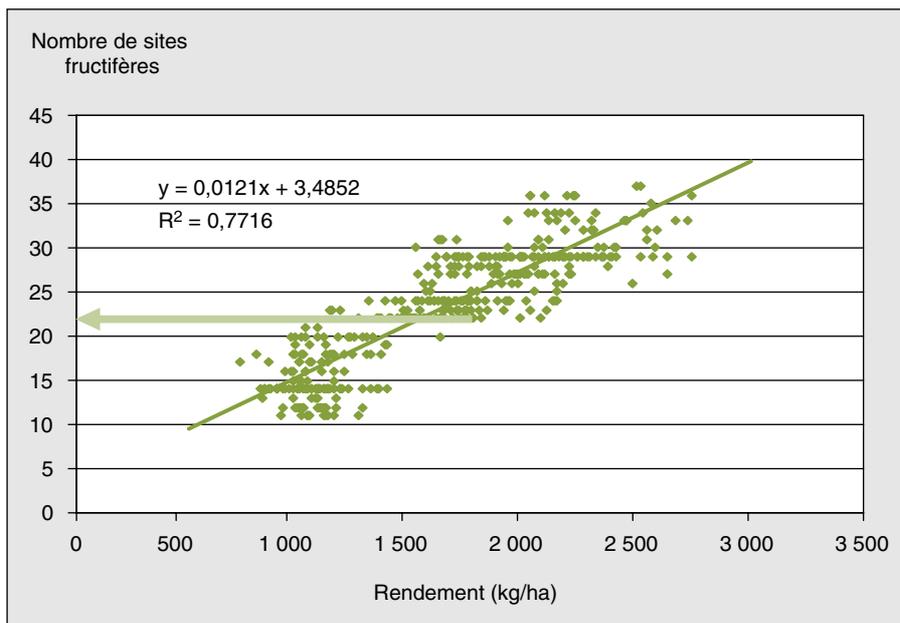


Figure 2. Droite de régression entre la hauteur des plants au 64<sup>e</sup> JAL et le rendement (ITR).

Figure 2. Plant height (64th DAE) and crop yield correlation for reference management sequence. JAL : jour après la levée.

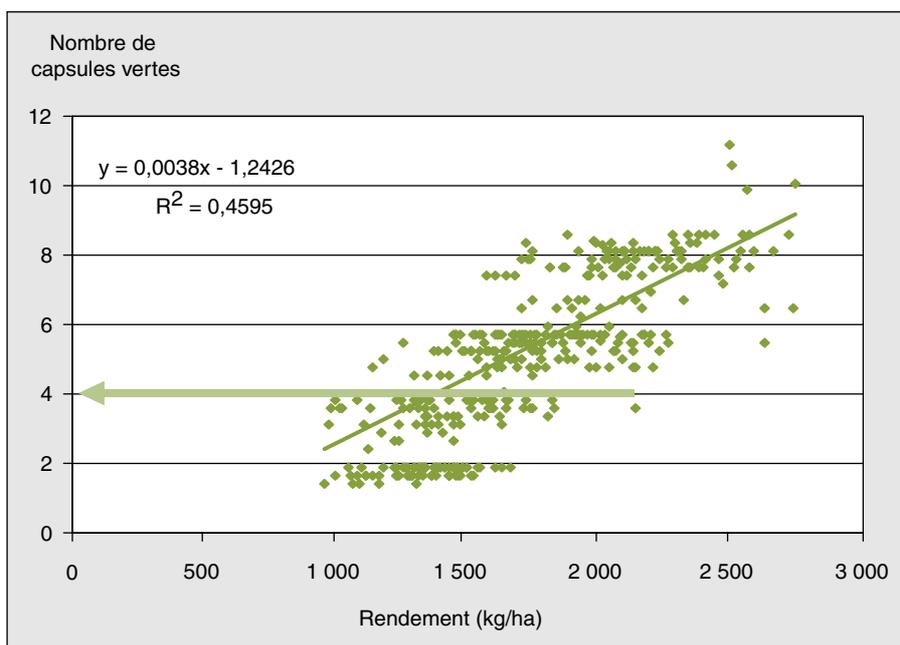
## Coût du risque

Si l'on assume la représentativité du jeu de variables en entrée des modèles utilisés, notamment l'équiprobabilité de chaque situation culturale (sol, climat, parasitisme), il devient possible (i) d'évaluer le coût de la mise en œuvre, au niveau de la zone de production, de chaque RDD à partir de la fréquence de déclenchement des différentes RDD et (ii) de mettre en rapport ces coûts avec les effets sur l'espérance de rendement et sur le risque de ne pas atteindre un objectif de rendement. Ainsi, comme l'indique le *tableau 4*, l'apport d'un complément azoté systématique seul (ITR + N) ou combiné à la protection phytosanitaire (ITR + N + PP), laisse espérer des gains



**Figure 3.** Droite de régression entre le nombre de sites fructifères au 64e JAL et le rendement (ITR).

**Figure 3.** Number of fruiting sites (64th DAE) and crop yield correlation for reference management sequence.  
JAL : jour après la levée.



**Figure 4.** Droite de régression entre le nombre de capsules vertes au 71° JAL et le rendement (ITR).

**Figure 4.** Number of green bolls (71th DAE) and yield correlation.  
JAL : jour après la levée.

de rendement (relativement à ITR) très nettement supérieurs à ceux d'un apport azoté (ITR + RDD<sub>1</sub>) et d'une protection phytosanitaire (ITR + RDD<sub>1+2</sub>), condi-

tionnés par les règles de décision. L'application de règles de décisions se traduit en revanche par des écarts type plus faibles que l'on peut mettre en relation avec une

plus grande résilience des itinéraires techniques correspondants. Le *tableau 5* présente l'évolution du risque de ne pas atteindre l'objectif de rendement de

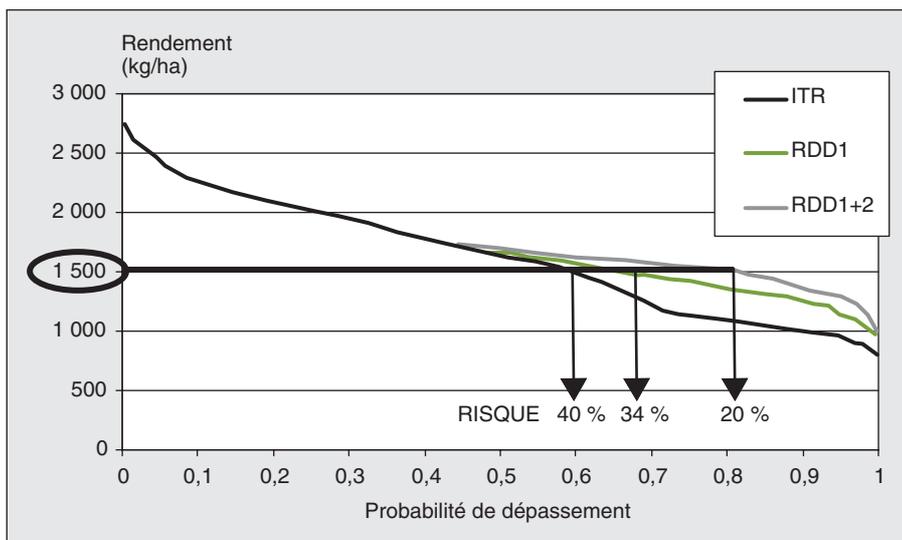


Figure 5. Effets sur le « risque » de l'application des règles de décision complément azoté (RDD1) et protection phytosanitaire (RDD2).

Figure 5. Risk limitations according to decision rules application (nitrogen application RDD1, plant protection program RDD2).

Tableau 4. Espérance et écart type du rendement associés aux RDD introduites dans l'itinéraire technique.

Table 4. Yield average and standard deviation according to crop management sequences and decision rules application.

Rendement (kg/ha)	ITR	ITR + RDD1	ITR + N	ITR + RDD1+2	ITR + N + PP
Espérance	1 623	1 719	1 940	1 770	2 076
Écart type	486	391	504	347	462

Tableau 5. Évaluation des risques et des coûts associés, de ne pas atteindre un objectif de rendement en fonction de l'itinéraire technique et de l'application des règles de décision.

Table 5. Probability of exceedence for different yield targets and the four crop management sequences along with associated cost.

Rendement objectif	Risque de ne pas atteindre le rendement objectif			
	ITR	ITR + RDD <sub>1</sub>	ITR + RDD <sub>1+2</sub>	ITR + N + PP
1 500 kg/ha	40 %	34 %	20 %	10 %
1 400 kg/ha	37 %	24 %	13 %	3 %
1 300 kg/ha	23 %	13 %	5 %	1 %
1 200 kg/ha	19 %	7 %	3 %	0 %
« Coûts associés »	0	0,3 N	0,3 N + 0,38 PP	N + PP

N : coût d'un apport complémentaire de 25 N/ha ; PP : coût d'une protection phytosanitaire poussée à partir du 15 août.

1 500 kg/ha, avec un « coût » de mise en œuvre de la RDD relative au complément azoté de (0,30 x coût de l'apport de 25 N/ha) du fait que 30 % des 396 situations culturales répondent aux critères de la mise en œuvre de la RDD<sub>1</sub>. De la même façon, le tableau 5 indique, pour un « coût » de mise en œuvre successive des 2 RDD, à savoir 0,30 N + 0,38 PP (38 % des situations sont redevables de la mise en œuvre de la RDD relative à la protection phytosanitaire), l'évolution des risques de ne pas atteindre les différents objectifs de rendement *a posteriori*. Ces niveaux de risques et les coûts associés aux RDD sont encadrés par ceux obtenus sur l'ITR sans complément azoté ni protection phytosanitaire et sur l'ITR + N + PP pour lequel le complément azoté et la protection phytosanitaire sont systématiquement appliqués. Il devient ainsi possible de décider d'une option stratégique sur la conduite de la culture cotonnière en connaissance des effets sur l'espérance de rendement, du coût de l'option retenue et des risques de ne pas atteindre un objectif de rendement donné.

## En guise de conclusion

La méthode fréquentielle proposée pour évaluer le risque de ne pas atteindre un objectif de rendement donné fait appel à un modèle mécaniste capable de simuler la croissance et le développement du cotonnier et à un modèle de simulation des dégâts occasionnés par des attaques de chenilles du cotonnier, sous différents itinéraires techniques et dans différentes conditions environnementales (sol, climat). L'évaluation du risque porte sur des interventions culturales dont la mise en œuvre est systématique ou conditionnée par l'application de règles de décision fondées sur des états de la culture. L'aide à la décision prend en compte aussi bien l'espérance de rendement que le risque de ne pas atteindre un objectif de rendement et le coût des différentes alternatives. D'importants efforts de caractérisation des zones de production cotonnière d'Afrique sur les conditions environnementales (sols, climat, parasitisme) méritent d'être consentis, en complément aux travaux de paramétrage et de validation des modèles utilisés, pour rendre opérationnelle et fiable la démarche proposée. ■

## Références

1. Jallas E, Cretenet M, Sequeira R, *et al.* COTONS, une nouvelle génération de modèles de simulation des cultures. *Agric Dev* 1999 ; 22 : 35-46.
2. Baulch PW, *et al.* *GOSSYM-COMAX User's Manual*. Starkville (Mississippi) : USDA-ES GOSSYM-COMAX Information Unit, 1993.
3. Nibouche S, Martin P, Cretenet M, Jallas E, Turner S. *CotonSimbad System : modeling feeding behavior of cotton bollworms for evaluation of crop pest interactions*. Proceedings Beltwide Cotton Conferences. Nashville, TN. Memphis (Tennessee) : National Cotton Council, 2003.
4. Nibouche S, Beyo J, Brévault T, *et al.* *Cotton bollworm economic injury level based on crop model predictions : another use for COTONS Model*. Proceedings World Cotton Research Conference - 3, March 9-13, 2003, Cape Town, South Africa. Washington (DC) : International Cotton Advisory Committee (ICAC), 2003.
5. Saxton KE, *et al.* Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci Soc Am J* 1986 ; 50 : 1031-6.
6. Bagdon JK, Plotkin S, Hesketh ES. *NAPRA Technology Transfer Overviews : Introduction*. USDA Report. Washington (DC) : United States Department of Agriculture (USDA), 1994.
7. Engel B, Managuerra H. *A www-based hydrologic and pesticide movement risk analysis system*. Proceedings of the International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida. 1998.